

文章编号:1671-6833(2004)04-0020-04

SAP 2000h 在静力弹塑性分析中的应用

姜 锐^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院,上海 200092;2. 郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要:对SAP 2000h 程序中静力弹塑性分析的基本原理及实现步骤进行分析,并结合中国规范对其中一些参数加以调整.最后用程序对一个四层框架进行静力弹塑性分析和抗震性能评价.结果表明:该方法可从层间位移角、塑性铰分布及变形等方面对结构进行综合的量化评价,并能揭示出结构在罕遇地震作用下的薄弱环节,是实现基于性能设计的有效方法.
关键词:静力弹塑性分析;能力谱;需求谱
中图分类号:TU 311.4 **文献标识码:**A

0 引言

随着建筑结构基于性能的设计方法越来越受到各国学者的重视,作为实现该方法的一个重要工具——静力弹塑性分析(Pushover Analysis)也得到日益广泛的应用,许多结构软件都增加了Pushover 分析的功能,如IDARC、SCM-3D、SAP 2000h、ETABS 以及国内的PK-PM 等.下面就SAP 2000h 中的分析原理及实现步骤作一介绍,并用一框架结构予以说明.

1 静力弹塑性分析基本原理

静力弹塑性分析没有很严密的理论基础,它基于以下两个基本假定^[1]:

- (1) 结构的响应与一等效的单自由度体系相关,也就是说结构响应仅由其第一振型控制;
- (2) 在整个地震反应过程中,结构的形状向量保持不变.

虽然上述假定在理论上不完全正确,但对于响应以第一振型为主的结构,用静力弹塑性分析可以对结构进行合理的性能评价.

SAP 2000h 程序提供的静力弹塑性分析方法,基于两本手册^[2]:美国技术应用委员会的《混凝土建筑抗震评估和修复》(ATC-40)和美国联邦紧急管理厅的《房屋抗震加固指南》(FEMA 273/274).其中混凝土塑性铰特性和性能指标来自于

ATC-40,而静力弹塑性分析的具体方法则采用了ATC-40的能力谱法.其主要步骤如下^[3]:

- (1) 对结构进行单调增加水平荷载作用下的静力弹塑性分析,得到结构的基底剪力-顶点位移关系,即 V_b-u_n 曲线(见图1).

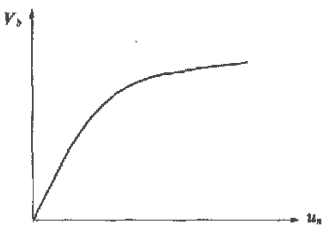


图1 Pushover 曲线

Fig.1 Pushover curve

- (2) 将 V_b-u_n 曲线转化为谱加速度 S_a 和谱位移 S_d 的关系曲线即能力谱曲线(图2).根据前述假定,对于不很高的结构,地震反应以第一振型为主,可用等效单自由度体系代替原结构(结构与等效单自由度体系之间的转化可通过对其动力方程进行等效实现),即

$$\begin{cases} S_a = \frac{V_b}{M_1^*} \\ S_d = \frac{u_n}{\Gamma_1 \phi_{n1}} \end{cases} \tag{1}$$

式中: Γ_1, M_1^* 分别为结构的第一振型参与系数和模态质量,且

收稿日期:2004-08-06;修订日期:2004-09-11

基金项目:上海市科委基金资助项目(032112087)

作者简介:姜 锐(1973-),女,河南省宜阳县人,郑州大学讲师,同济大学博士研究生,主要从事结构抗震研究.

$$\left\{ \begin{aligned} M_1^* &= \frac{(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1})^2}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1}^2} \\ \Gamma_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1}^2} \end{aligned} \right. \quad (2)$$



图 2 能力谱
Fig. 2 Capacity spectrum

式中： m_i 为第 i 层质点的质量； ϕ_{i1} 为振型 1 中质点的振幅。

(3) 建立需求谱曲线. 将单自由度弹性体系的阻尼比为 5% 的反应谱曲线 ($S_a \sim T$ 格式) 通过下式转化为弹性需求谱 ($S_a \sim S_d$ 格式)

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (3)$$

在弹性需求谱的基础上, 通过考虑等效阻尼比 ξ 或延性比 μ 的方法得到折减的弹塑性需求谱 SAP2000h 采用的是考虑等效阻尼比 ξ 的方法, 如图 3 所示, ξ 由最大位移反应的一个周期内的滞回耗能来确定^[4], 即

$$\xi = \frac{E_D}{4 E_S} = \frac{63.7(a_y d_p - d_y a_p)}{a_p d_p} \quad (4)$$

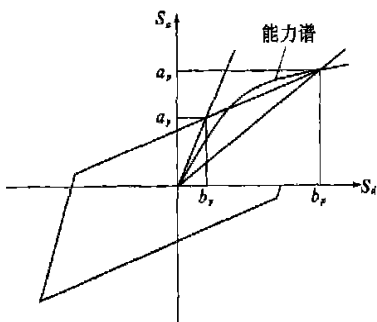


图 3 用阻尼比折减反应谱
Fig. 3 Reduced response spectrum

式中： E_D 滞回阻尼耗能； E_s 为最大应变能； d_p, a_p 分别为等效单自由度体系的最大位移和对应加速度； d_y, a_y 则分别表示屈服时的相应值。

有了 ξ , 通过对弹性需求谱的折减, 即可得到弹塑性需求谱

(4) 性能点的确定. 将能力谱曲线和某一水准地震的需求谱画在同一坐标系中, 两曲线的交点即为性能点, 将其所对应的谱位移按式 (1) 转化为结构的顶点位移, 根据其在原结构 $V_b \sim u_n$ 曲线上的位置, 可确定结构在该地震作用下的塑性铰分布、杆端截面的曲率及侧移等, 综合评价结构的抗震能力。

2 实施步骤

2.1 建立模型及内力分析

建立结构模型并进行竖向荷载作用下的内力分析. 对梁、柱, SAP2000h 用框架单元模拟, 现浇板用壳单元模拟。

2.2 定义塑性铰

SAP2000h 中的塑性铰本构关系如图 4 所示^[4]. 其中 AB, BC, CD, DE 分别表示弹性段、强化段、卸载段和破坏段. 定义塑性铰有两种方法, 一种是自定义, 即由截面配筋情况计算出几个关键点 B, C, D, E 的位置并输入到本构关系中; 另一种是程序按照美国规范 FEMA 273 和 ATC-40 给定. 为简单起见, 本文采用后一种方法, 即采用程序给的默认值。

对于梁单元, 一般仅考虑弯矩屈服产生塑性铰, 即定义为程序中的 M_3 ; 对柱单元, 考虑由轴力和双向弯矩相关作用产生塑性铰, 即定义为 PMM. 塑性铰的位置, 则设在梁、柱杆件的两端, 因为一般情况下, 两端弯矩最大。

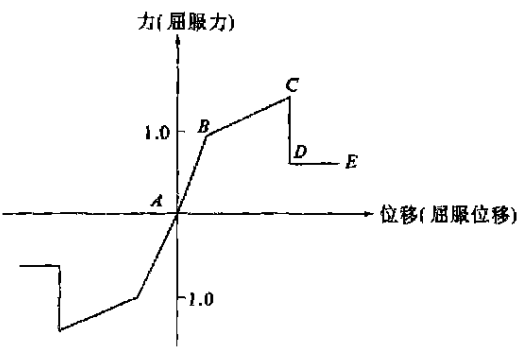


图 4 塑性铰本构关系
Fig. 4 Constitution relationship of plastic hinges

2.3 侧向加载模式及分析工况

SAP2000h 程序提供了 3 种加载方式: 自定义分布, 均匀加速度分布和振型荷载分布. 其中均匀加速度分布的侧向力是由均一的加速度和相应质量分布的乘积得到的, 相当于均匀分布; 振型荷载分布的侧向力是用给定的振型和该振型下的圆频率的平方 (ω^2) 及相应的质量的乘积获得的, 通常

取第一振型,相当于倒三角分布;也可采用自定义加载方式,将以上两种分布按一定系数组合.

定义 Pushover 分析工况时,要将竖向荷载作为第一工况,计算时首先计算第一工况即竖向荷载下的内力和变形,其它工况即水平力作用下的内力和变形是在此基础上增加的.

2.4 结果分析和性能评价

经过静力弹塑性分析,得到性能点,根据该点的变形,对以下 3 个方面进行评价:

- (1) 顶点位移. 看其是否满足规范规定的弹塑性顶点位移限值要求.
- (2) 层间位移角. 看其是否满足规范规定的弹塑性层间位移角限值要求.
- (3) 构件的局部变形. 即梁、柱塑性铰的变形,检验是否超过建筑某一性能水准下的允许变形.

ATC-40 将结构遭遇地震后可能出现的状态分为 IO(Immediate Occupancy), LS(Life Safety), SS(CP)(Structure Stability) 等状态,分别表示“可尽快修复”,“危害人生命”及“结构稳定”.并给出了构件在这几种相应状态下的塑性限值,如图 5 所示,其中 B 点表示出现塑性铰, C 点为倒塌点, I, L, P 分别代表上述 3 种状态对应的性能点,且每个点的横坐标即为相应的弹塑性位移限值.

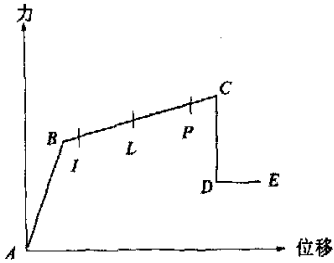


图 5 不同性能水准下的塑性铰位移限值
Fig. 5 Deformation limitation of plastic hinges at different performance level

3 算例

3.1 工程概况

该工程为一个四层框架结构,底层高 6.77 m,顶层 3.98 m,其余两层高 4.5 m.梁柱混凝土标号均为 C30.框架梁截面 0.4 m×0.8 m,柱截面 0.7 m×0.7 m,楼板采用 120 厚现浇混凝土板.已用 PKPM 进行了设计配筋,所有钢筋均采用二级钢筋.模拟框架整体的三维图形如 6 所示.

本工程按 7 度抗震设防,场地类别为 IV 类,设

计地震分组为第三组,场地特征周期 0.9s.

3.2 数据准备

按照抗震规范,拟对结构进行多遇地震和罕遇地震下的计算. ATC-40 中提供的反应谱如图 7 所示^[4],根据我国规范与之对比修正^[3],可确定系数 C_A 和 C_V :

- 7 度多遇地震时, $C_A=0.032, C_V=0.072$;
- 7 度罕遇地震时, $C_A=0.2, C_V=0.45$.

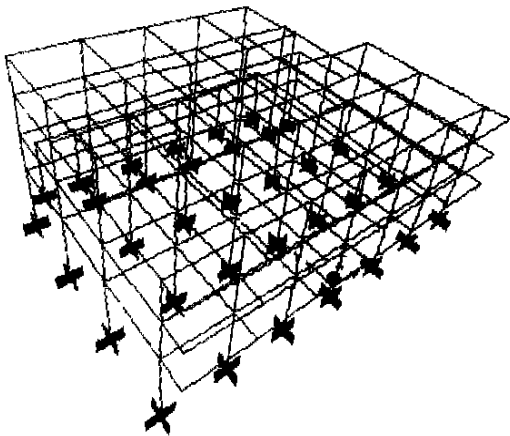


图 6 结构的三维模型
Fig. 6 Three dimension model of the structure

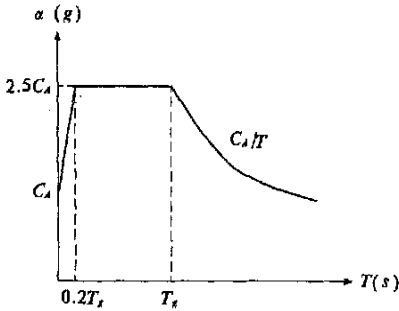


图 7 程序中的反应谱
Fig. 7 Response spectrum in SAP 2000h

塑性铰的定义如前所述,梁和柱两端分别赋予弯矩 M_3 塑性铰和轴力弯矩相关的铰 (PMM),且采用程序默认值,即不用输入 B、C、D、E 各点的值,而是由程序根据截面尺寸及配筋确定.

侧向加载分布拟采用均匀分布和考虑第一振型的振型荷载分布,为简单起见,本文仅考虑沿方向进行推覆分析.

3.3 计算结果与分析

3.3.1 多遇地震时

采用均匀加载方式推覆的性能点 $S_d=14.9$ mm,转化为顶点位移 $u_n=16.9$ mm.

采用振型荷载方式推覆的性能点 $S_d=16.4$ mm,转化为顶点位移 $u_n=22.2$ mm.

结构在达到上述两种状态的目标位移时,均无塑性铰出现,说明结构处于弹性阶段;在性能点时结构的弹性层间位移及位移角见表 1.

由表 1 可见,在多遇地震作用下,结构达到性能点时的层间位移角均小于规范规定的弹性层间位移角限值 $1/550^3$.

3.3.2 罕遇地震时

采用均匀加载方式推覆的性能点位移转化为顶点位移 $u_n=116.9\text{ mm}$.

采用振型荷载方式推覆的性能点位移转化为顶点位移 $u_n=147.5\text{ mm}$.

结构在性能点时的层间位移及层间位移角见表 2.

表 1 多遇地震时的层间位移及层间位移角

Tab.1 Story displacement and rotation under frequent earthquake action

层号	顶点侧移/mm		层间位移角/(°)	
	方式 1	方式 2	方式 1	方式 2
4	17.8	18.9	1/3092	1/1589
3	16.6	16.4	1/1957	1/1650
2	14.3	13.7	1/987	1/952
1	9.7	9.0	1/699	1/754

说明:表中方式 1 指均匀分布的侧向力加载模式,方式 2 指取第一振型时的振型荷载分布的侧向力加载模式.

表 2 罕遇地震时的层间位移及层间位移角

Tab.2 Story displacement and rotation under seldom earthquake action

层号	顶点侧移/mm		层间位移角/(°)	
	方式 1	方式 2	方式 1	方式 2
4	123.6	130.6	1/630	1/213
3	117.3	112.0	1/331	1/285
2	103.7	96.2	1/138	1/134
1	71.2	62.7	1/95	1/108

由表 2 可见,两种加载方式推覆时的层间位移角均小于规范规定的弹塑性层间位移角限值 $1/50^3$.

两种情况下结构在性能点时的塑性铰分布如图 8 所示,图 8(a) 表示在均匀分布的侧向力时的塑性铰分布,图 8(b) 表示振型荷载分布的侧向力时的塑性铰分布.由图 8 可见,铰主要出现在二、三层的梁端及底层柱两端、二层柱顶,四层的少数梁端也出现了塑性铰.从颜色上看,这些铰的变形处于 B 区段,即属于可尽快修复使用的范畴.

综合上述结果,该工程设计满足抗震性能要求,但在底层和二层柱顶出现了塑性铰,建议箍筋可适当再加密.

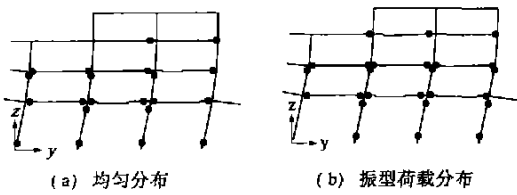


图 8 结构在性能点时的塑性铰分布

Fig.8 Plastic hinge distribution of the structure at the performance point

4 结束语

介绍了运用SAP2000h 进行静力弹塑性分析(Pushover) 的基本原理,结合一个四层框架结构进行了抗震分析.结果表明,Pushover 分析方法不仅能对照规范对已有结构抗震性能作出合理的评价,而且可以对结构在罕遇地震下可能会出现薄弱部位及破坏情况进行较具体的量化估计,比现行抗震规范中只是验算薄弱层的弹塑性位移更进一步,也为实现基于性能的抗震设计提供了很好的计算方法.

用SAP2000h 进行静力弹塑性分析,还有一些需要完善的地方,如塑性铰特性的定义,可以通过对截面的分析采用自定义输入,将会使分析结果更精确;在侧向力分布形式上,也可以采用其他的分布形式,这将需要进一步研究.

参考文献:

[1] HELMUT Krawinkler ,SENEVIRATNA P K .Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation [J] . Engineering Structures , 1998,20:452~464.

[2] 汪大绥,贺军利,张凤新.静力弹塑性分析(Pushover Analysis) 的基本原理和计算实例[J] .世界地震工程,2004,20,(1) :45~53.

[3] 熊向阳.建筑结构弹塑性静力分析push-over 方法 [D] .上海:同济大学,2002.

[4] 联邦工程顾问股份有限公司,李森丹.SAP2000 入门与工程上之应用 [M] .台湾:科技图书公司,2000.

[5] GB50011-2001,建筑抗震设计规范[S] .

(下转第 28 页)

Experimental Investigation of RC Beam Strengthened with CFRP

KONG Qn , LIU Li -xin

(College of Civil Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China)

Abstract : In contrast with normal beam the test in bending of cracked beam and sound beam strengthened with CFRP is designed in order to study how the strengthening method affects the performance of the beams . If the steel bars in initial state do not yield ,whether the beam is cracked or not ,CFRP cracking in the middle of the beam is the main failure mode . Bearing capacity can be increased because of better fracture and ductility and stiffness can be better because CFRP can limit the development of cracks . The load is taken on mainly by CFRP after the steel bars yield ,but only 60 percent of the strength of CFRP can be fulfilled .

Key words : carbon fiber reinforced polymer laminate (CFRP) ;beams under flexure ;strengthen ; bearing capacity ; stiffness ; ductility ; fracture

(上接第 23 页)

Application of SAP 2000 in Nonlinear Static Analysis

JIANG Rui ^{1,2}

(1.College of Civil Engineering ,Tongji University , Shanghai 200092,China ; 2.College of Civil Engineering ,Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China)

Abstract : This paper presents the principle and calculation procedures of the method in SAP 2000 , while modifying some coefficients according to China Code for Seismic Design . A frame structure is then analyzed and the result proves that the push over method is effective in Performance Based Design since it can not only give a general assessment of the structure with regard to many points such as the plastic hinge distribution ,the inelastic displacement of stories , but also reveal the weak points of the structure under the action of earthquakes that seldomly occur .

Key words : static nonlinear analysis ;capacity spectrum ; demand spectrum